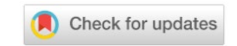
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING





УДК 628.465.9
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

Научная статья

Модель многопараметрической оптимизации характеристик канатной дороги в системе транспортировки твердых бытовых отходов

Ю.В. Марченко, В.В. Дерюшев, С.И. Попов, Э.В. Марченко
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ marchenko-6470@mail.ru

Аннотация
Введение. Современная научная и прикладная литература довольно обстоятельно рассматривает проблемы функционирования канатных дорог. В первую очередь речь идет о вопросах обеспечения надежности и безопасности движения — как во время эксплуатации, так и в процессе разработки проекта.
Кроме того, рассматривается взаимосвязь канатных дорог с окружающей средой, выясняется уровень экологической нагрузки от данного вида транспорта. Хорошим решением могло бы стать использование математических моделей, способных учитывать комплекс параметров и критериев, характеризующих канатную дорогу как систему. Этот же подход был бы полезен для оптимизации технических характеристик объекта. Однако в литературе не представлено описание такого решения. Данный пробел отчасти восполняет представленная работа. Ее цель — создание модели многопараметрической оптимизации технических характеристик канатной дороги для транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО).
Материалы и методы. Для уточнения теоретической базы изучена литература, в целом описывающая проблемы канатных дорог и их решения. Математические расчеты обоснованы объемной подборкой уравнений, доказавших адекватность при определении полезной транспортной работы, нагрузки, корректировки времени и скорости перемещения грузов и других значимых параметров исследуемой системы. При формировании модели исходили из принципов Л.С. Понтрягина (игольчатая вариация) и Гамильтона — Остроградского (кинематика определенного отрезка дороги). Текстовые данные об особенностях элементов системы и их взаимодействии сведены в таблицы. Итоги главных расчетов визуализированы в виде графиков.
Результаты исследования. Представлено решение задачи оптимального управления канатной дорогой, по которой перемещают ТБО. Вектор управления движением показан как вектор оптимизируемых технических параметров системы: скорость движения, натяжение каната, число и вес контейнеров. Воспроизводится известное решение задачи оптимизации в общем виде, которое предполагает определение вектор-функции управления и соответствующей ему траектории с достижением минимума целевого функционала. Отмечено слабое место системы дифференциальных уравнений для реализации целей данной научной работы. В этой связи предложено рассматривать исследуемый участок канатной дороги как динамическую систему с распределенными параметрами. Детально описана постановка задачи многокритериальной оптимизации. Перечислены преимущества сокращения количества учитываемых критериев и обосновано применение метода редукции, который базируется на иерархической структуризации системы частных критериев оптимальности. Рассмотрены во взаимосвязи четыре главных элемента системы транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО). Это канатная дорога, транспортно-логистический пункт, транспортно-логистический терминал и среда, которая генерирует ТБО. В рамках данной работы речь идет об урбанизированной среде. Перечислены подэлементы названных элементов и показаны 12 направлений их взаимодействий. Детально, в рамках трехуровневой иерархии, описаны четыре главных комплексных показателя сложности изучаемой системы: среда, дорога, пункт и терминал. Показано решение многокритериальной задачи оптимизации, выполнены расчеты по оптимизируем параметрам — характеристика сложности дороги и характеристика местности. Результаты расчетов представлены в виде графиков. Таким образом проиллюстрированы зависимости оптимизируемых параметров от массы загруженного контейнера, длины и скорости канатной дороги.

Обсуждение и заключение. Основной итог исследования — сформировано представление о возможности математического решения многопараметрической и многокритериальной задачи оптимизации двух характеристик канатной дороги (сложность и особенность местности). Предложенный подход позволяет менять иерархию в комплексе показателей. Результаты данной научной работы можно использовать при необходимости интеграции проекта дороги с нейросетевыми моделями, в работе с нечеткими лингвистическими показателями, для решения прикладных задач.

Ключевые слова: сложность канатной дороги, сложность среды канатной дороги, транспортировка твердых бытовых отходов, многокритериальная оптимизация

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам за помощь.

Для цитирования. Марченко Ю.В., Дерюшев В.В., Попов С.И., Марченко Э.В. Модель многопараметрической оптимизации характеристик канатной дороги в системе транспортировки твердых бытовых отходов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(4):80–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

Original article

Model of Multi-Parameter Optimization of Cable Car Characteristics in a Solid Waste Transportation System

Yulianna V. Marchenko, Viktor V. Deryushev, Sergey I. Popov, Edward V. Marchenko
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ marchenko-6470@mail.ru

Abstract
Introduction. Modern scientific and applied literature examines the problems of cable cars functioning quite thoroughly. First of all, it concerns ensuring the reliability and safety of traffic, both during operation and during project development.
In addition, the paper considers the relationship of cable cars with the environment and the level of environmental load from this type of transport. A good solution could be the use of mathematical models that can take into account a set of parameters and criteria that characterize the cable car as a system. The same approach would be useful for optimizing technical characteristics of the object. However, there is no description of such a solution in the literature. This gap is partially filled by the presented work. The study aims to create a model of multivariable optimization of cable car technical characteristics for the transportation of municipal solid waste (MSW).
Material and Methods. To clarify the theoretical basis, the literature describing the problems of cable cars and their solutions in general has been studied. Mathematical calculations were justified by a volume of equations that proved their adequacy in determining the useful transport work, load, adjustment of time and speed of cargo movement and other significant parameters of the system under study. When forming the model, we proceeded from the principles of L.S. Pontryagin (needle variation) and Hamilton — Ostrogradsky (kinematics of a certain road segment). Text data about the features of the system elements and their interaction were summarized in tables. The main calculations results were visualized in the form of graphs.
Results. The solution to the problem of optimal control of the cable car on which solid waste was moved was presented. The motion control vector was shown as a vector of optimized technical parameters of the system: speed of movement, rope tension, number and weight of containers. The well-known solution to the optimization problem was reproduced in a general form, which involved determination of a control vector function and its corresponding trajectory with the achievement of a minimum of the target functional. The weak point of the system of differential equations for the realization of the goals of this scientific work was noted. In this regard, it was proposed to consider the investigated section of the cable car as a dynamic system with distributed parameters. The formulation of the multi-criteria optimization problem was described in detail. The advantages of reducing the number of criteria taken into account were listed and the use of the reduction method, which was based on the hierarchical structuring of the system of partial optimality criteria, was justified. Four main elements of the municipal solid waste (MSW) transportation system were considered in interrelation. This was a cable car, a transport and logistics point, a transport and logistics terminal and an environment that generated solid waste. Within the framework of this work, we considered an urbanized environment. The sub-elements of the named elements were listed and 12 directions of their interactions were shown. In detail, within the framework of a three-level hierarchy, four main complex indicators of the complexity of the system under study were described: environment, road, point and terminal. The solution of a multi-criteria optimization problem was

shown, calculations were performed for the optimized parameters — the characteristic of the complexity of the road and the characteristic of the terrain. The results of calculations were presented in the form of graphs. Thus, the dependences of the optimized parameters on the weight of the loaded container, the length and speed of the cable car were illustrated. ***Conclusions.*** The main result of the study is an idea of the possibility of a mathematical solution of a multivariable and multi-criteria problem of optimizing two characteristics of a cable car (complexity and terrain feature). The proposed approach allows you to change the hierarchy in the complex of indicators. The results of this scientific work can be used, if necessary, to integrate the road project with neural network models, to work with fuzzy linguistic indicators, to solve applied problems.

Keywords: cable car complexity, cable car environment complexity, transportation of municipal solid waste, multi-criteria optimization

Acknowledgements: the authors would like to thank their colleagues for their help.

For citation. Marchenko YuV, Deryushev VV, Popov SI, Marchenko EV. Model of Multi-Parameter Optimization of Cable Car Characteristics in a Solid Waste Transportation System. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):80–96. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-80-96

Введение. Современные канатные дороги представляют собой высокотехнологичные комплексы для перемещения пассажиров и грузов. Им посвящены многочисленные научные и прикладные исследования. Изучаются технические особенности этих объектов. Уточняются вопросы их взаимосвязи с окружающей средой. Следуя трендам последних лет, авторы выясняют уровень экологической нагрузки от данного вида транспорта. В фокусе внимания неизменно остается обеспечение надежности и безопасности движения — как во время эксплуатации, так и в процессе разработки проекта.

Многие авторы и коллективы изучали вопросы улучшения технических характеристик канатных дорог за счет усовершенствования их конструкций. Результаты таких исследований реализованы в проектах пассажирского и грузового канатного транспорта [1–3]. В работах [4, 5] представлен иной подход к проблеме надежности и безопасности эксплуатации рассматриваемых объектов. В данном случае качество проекта обусловлено количеством факторов, которые влияют на устойчивость системы. В этой связи целесообразно было бы рассмотреть возможности многопараметрической и многокритериальной оптимизации технических характеристик канатных дорог. Однако в современной научной литературе нет публикаций на эту тему.

Цель представленной работы — показать возможность создания модели многопараметрической оптимизации технических характеристик канатной дороги для транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО).

Материалы и методы. В рамках представленной научной работы обобщены данные литературы, посвященной изучаемому вопросу. Один из подходов к решению проблемы описан в [6]. ТБО собирают в съемные контейнеры, уплотняют, помещают в вакуум и грузовым автотранспортом доставляют в транспортно-логистический пункт. Здесь контейнер перемещают на грузовую канатную дорогу. Она соединяет транспортно-логистический пункт с транспортно-логистическим терминалом, где контейнер перегружают на промежуточный замедляющий конвейер, снимают с канатной дороги, разгружают, затем моют и обеззараживают. Описанная схема предполагает экологический контроль процессов, а также техобслуживание и ремонт.

Рассмотрим участок канатной дороги между двумя опорами (рис. 1). Предположим, что опоры расположены на одинаковой высоте и на расстоянии l друг от друга. Между ними может находится один или несколько контейнеров весом $G_{кi}$ ($i = 1, \ldots, n$) каждый.

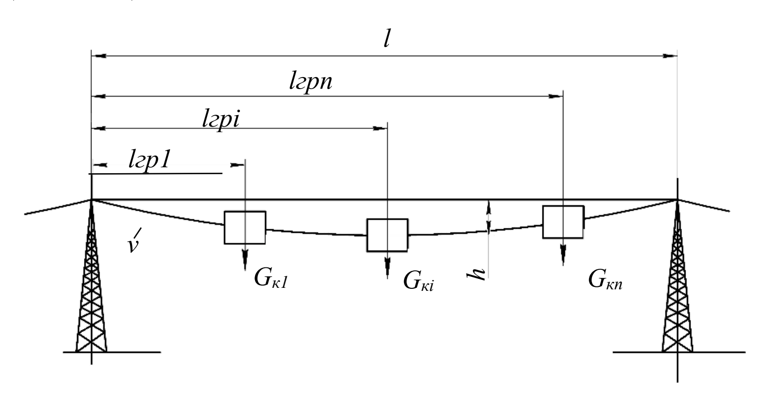


Рис. 1. Схема процесса транспортирования контейнеров на канатной дороге

На выделенном участке канатной дороги контейнеры с грузом общим весом $G_{\text{гр}} = \sum_{i=1}^{n} G_{\kappa i}$ доставляются на определенное расстояние, и при этом совершается полезная транспортная работа A, равная произведению количества груза в тоннах на расстояние $l_{\text{гр}}$ в км:

$$A = G_{\text{гр}} \cdot l_{\text{гр}} = \sum\nolimits_{(i=1)}^{n} (G_{\kappa i} \cdot l_{\text{гр}i}).$$

Транспортная работа измеряется в тонно-километрах. Производительность транспортного процесса — это полезная транспортная работа в единицу времени:

$$W = \frac{G_{\text{гр}} l_{\text{гр}}}{t}$$

где t — время, затраченное на перемещение груза общим весом $G_{\text{гр}}$ на расстояние суммарного груза от опоры $l_{\text{гр}}$; $l_{\text{гр}} = \sum\nolimits_{(i=1)}^{n} l_{\text{гр}i} / n$.

Величина $v = l_{\text{гр}} / t$ представляет собой скорость перемещения грузов по канатной дороге. В первом приближении ее можно считать равной скорости движения каната. В общем случае, учитывая провисание каната с контейнерами на величину h, скорость перемещения грузов по канатной дороге будет несколько меньше скорости движения каната.

Эффективный процесс — это доставка как можно большего количества грузов за меньшее время на заданное расстояние. В нашем случае грузы заданным общим весом $\sum G_{\text{гр}}$ перемещаются по канатной дороге на расстояние l между двумя опорами. Тогда задача повышения эффективности сводится к минимизации времени перемещения $t_{\text{гр}}$:

$$t_{\text{гр}} = \frac{\sum G_{\text{гр}} l}{v \sum_{i=1}^{n} G_{\kappa i}} \to \min.$$

При решении задач по сокращению времени транспортировки варьируются такие характеристики канатной дороги, как скорость движения v, натяжение каната T, количество контейнеров между опорами n и вес одного контейнера с грузом $G_{\kappa i}$. Значение $G_{\kappa i}$ принимаем одинаковым для всех контейнеров. Тогда задача повышения эффективности сводится к максимизации:

$$v \sum_{(i=1)}^{n} G_{\kappa i} \to \max. \quad (1)$$

Скорость движения грузовых подвесных канатных дорог ограничивается нормативами в области промышленной безопасности[1]. Параметр скорости обычно ограничивается коэффициентом динамичности μ:

$$\mu = \frac{A_{\text{д}}}{A_{\text{ст}}},$$

где $A_{\text{д}}$ — амплитуда колебаний контейнера, зависящая от скорости движения каната; $A_{\text{ст}}$ — статическая (или равновесная) амплитуда, т. е. статическая деформация упругой связи (максимальное провисание каната) под действием сил веса всех контейнеров при нулевой или очень низкой скорости движения каната.

Изменение формы и частоты колебаний [7] приводит к изменению динамических нагрузок на канаты и другие силовые элементы. Перегрузка, действующая на контейнер в вертикальном направлении по оси z:

$$\beta = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{ст}}} = 1 + \frac{\ddot{z}}{g},$$

где $P_{\text{д}}$ — динамическая нагрузка, $P_{\text{ст}}$ — статическая нагрузка, $\ddot{z}$ — ускорение контейнера в направлении вертикальной оси z.

Итак, будем исходить из требований безопасности. Учтем влияние натяжения каната и параметров из выражения (1) на коэффициент динамичности и величину перегрузок. В таком случае решение задачи повышения эффективности требует решения оптимизационной задачи динамики канатной системы, которая описывается конечным множеством параметров. Таким образом, речь идет о многопараметрической задаче.

Результаты исследования

[1]*Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров».* Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 441 от 13 ноября 2020 г. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/573191373 (дата обращения 25.09.2023).

Постановка задачи оптимизации для систем с сосредоточенными и распределенными параметрами. Для реализации поставленной задачи применим игольчатую вариацию Л.С. Понтрягина [8] к инвариантным признакам действительного движения динамической системы.

В классической постановке задачи оптимального управления канатная дорога между опорами рассматривается как голономная динамическая система, механические связи которой сводятся к геометрическим. Для рассматриваемой системы справедлив принцип Гамильтона — Остроградского [9], в соответствии с которым на траектории $q(t)$, не содержащей кинематических фокусов:

$$\delta J = \int_0^{t_k} (\delta T + \delta' A)\, dt = 0\,, \tag{2}$$

$$t = 0,\ q(0) = q_0,\ t = t_k,\ q(t_k) = q_k,$$
$$\delta q_0 = \delta q_k = 0\,, \tag{3}$$

где J — целевой функционал; $T = T(q,\ \dot{q})$ — кинетическая энергия; $\mathrm{A} = \int_{q(0)}^{q(t_k)} Q dq$ — работа обобщенных сил, которые зависят от обобщенных координат; $q(t) = [q_1,\ ...,\ q_n]^T \in R^n$ — вектор задаваемых обобщенных координат; $Q(t) = [Q_1,\ ...,\ Q_n]^T \in R^n$ — вектор обобщенных сил; $t = [0,\ t_k]$ — время; δ — символ варьирования; δ' — символ бесконечно малого приращения величин.

Вектор обобщенных сил зависит от вектора управления $u(t)$:

$$u(t) \in R^m,\ \ Q = Q(q, \dot{q}, u, t),\ m \leq n. \tag{4}$$

Вектор управления движением — это вектор оптимизируемых технических параметров системы: скорость движения, натяжение каната, число и вес контейнеров.

В общем виде задача оптимизации предполагает определение вектор-функции управления $u(q,\dot{q})$ и соответствующей траектории $q(t)$, чтобы достигался минимум целевого функционала:

$$J = \int_0^{t_k} F\left(q,\dot{q}\right) dt \to min. \tag{5}$$

При условии (2), (3) и ограничениях на управление:

$$u \in \overline{G_u}\,, \tag{6}$$

где $\overline{G}_u$ — замкнутое множество допустимых управлений в пространстве задаваемых на конечном интервале времени $[0,\ t_k]$ функций; $F(q,\dot{q})$ — знакопостоянная функция.

Допустим, в первом приближении канатная система моделируется как динамическая и состоит из конечного числа сосредоточенных масс (контейнеров), соединенных между собой упругими связями. В этом случае для решения задачи оптимизации нужно определить законы изменения скорости движения $v(t) = \dot{x}(t)$, натяжения каната $T = f(t)$, значения числа контейнеров $n(x,\dot{x})$ и их веса G_{ki} — такие, чтобы целевой функционал J принимал минимальное значение:

$$J = \int_0^{t_k} \left[\left(x - x_k\right)^2 + \varepsilon \left(\dot{x} - \dot{x}_k \right)^2 \right] dt \to min\,. \tag{7}$$

Начальные и терминальные условия для (7):

$$t = 0,\ x\left(0\right) = 0,\ \dot{x}(0) = v_{\min};\ t = t_k,\ x\left(t_k\right) = l, \dot{x}(t_k) = v_{\max}. \tag{8}$$

Кроме того, учитывая (2), будем иметь в виду обыкновенные дифференциальные уравнения движения рассматриваемой динамической системы. На скорость движения, величину натяжения, количество и вес контейнеров накладываются ограничения:

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max};\ 0 < T \leq T_{\max};\ 1 < n \leq n_{\max};\ G_{\min} < G_{ki} \leq G_{\max}. \tag{9}$$

К тому же ограничиваются ускорения контейнеров в направлении оси x, в поперечном направлении (по оси z), а также поперечные отклонения i-го контейнера $w(x_i,t)$ по оси z:

$$\ddot{x}_i(t) \leq \ddot{x}_{\max};\ \ddot{z}_t(t) \leq \ddot{z}_{\max};\ w(x_i,t) \leq w_{\max}. \tag{10}$$

Для решения задачи оптимизации вместо целевого функционала (7) рассматривается расширенный функционал:

$$J = \int_0^{t_k} \left\{ \frac{1}{2} x^2 + \mu \left[\frac{\dot{x}^2}{2} + \int_{x_0}^{x} u\, dx \right] \right\} dt\,, \tag{11}$$

где μ — множитель Лагранжа.

Отметим слабое место построения системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения рассматриваемой динамической системы с переменным числом сосредоточенных масс и изменяемыми

граничными условиями. Дело в том, что для реализации такого подхода необходимо ввести ряд допущений, которые снижают достоверность результатов оптимизации. Поэтому соответствующий участок канатной дороги рассмотрим как динамическую систему с распределенными параметрами. В этом случае для исследования динамических процессов системы с подвижной дискретной и распределенной инерционной нагрузкой используем приведенное в однородное дифференциальное уравнение поперечных колебаний каната в частных производных:

$$\rho(x)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+2\rho(x)v\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial t}-(T-\rho(x)v^2)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0, \quad (12)$$

где $\rho(x)=\rho_0+\sum_{i=1}^{n}G_{грi}\delta(x-x_i)$; ρ_0 — масса единицы длины каната; $G_{грi}$ — масса i-го сосредоточенного груза; $\delta(x-x_i)$ — функция Дирака; x_i — координата, определяющая положение i-го груза; T — натяжение каната; $w(x,t)$ — поперечное отклонение; v — продольная скорость движения каната.

Подробный обзор методов решения задач оптимизации для динамических систем с распределенными параметрами, в том числе для гиперболических систем вида (10) с управляемыми связями на границах, приведен в работе [9]. Большинство методов строятся на предположении, что из всех допустимых управляющих воздействий на рассматриваемую систему лишь одно соответствует оптимальному состоянию процесса, т. е. решению дифференциального уравнения (10). Еще одно предположение — выпуклость множества допустимых управлений в целевом функционале — например, как в (7). В то же время для систем с распределенными параметрами допустимо отсутствие оптимального управления или наличие многомодальных функций в целевом функционале при многопараметрической оптимизации. К тому же сложность получения необходимых (и, желательно, достаточных) условий оптимальности не гарантирует адекватности результатов решения модельной оптимизационной задачи целям оптимизации для реального объекта. Указанный недостаток характерен и для динамических систем, моделируемых обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Сказанное выше доказывает актуальность разработки подходов, которые позволят преодолеть отмеченные выше недостатки. Речь идет о методах так называемого субоптимального управления. К таковым относятся методы многокритериальной оптимизации, используемые в задачах принятия решений или задачах выбора. В данном случае они дают возможность рассматривать одновременно большее число параметров оптимизируемой системы в многомерном пространстве критериев (показателей).

Постановка задачи многокритериальной оптимизации. Пусть U — n-мерный вектор оптимизируемых технических параметров системы (вектор управления) и $n > 1$. В нашем случае $n = 4$. Компоненты вектора: u_1 — скорость движения, u_2 — натяжение каната, u_3 — число контейнеров, u_4 — вес одного контейнера. На вектор U, как отмечалось выше, могут быть наложены ограничения, составляющее замкнутое множество $\overline{G_u}$ вида (6), которое называется множеством допустимых значений вектора оптимизируемых параметров. Размерность этого множества $r \geq n$. Ограничения и ограничивающие функции имеют вид (9) и (10).

Введем в m-мерном арифметическом пространстве (критериальном пространстве) R_e^m векторный критерий оптимальности $K(U)$, определенный на множестве $\overline{G_u}$. Здесь $m \geq 1$, т. е. в предельном случае при $m = 1$ задача оптимизации становится однокритериальной, при $m > 1$ — многокритериальной. Компоненты векторного критерия оптимальности — частные критерии оптимальности:

$$K(U) = \{k_1(U), k_2(U), \ldots, k_m(U)\}. \quad (13)$$

На них также могут быть наложены ограничения. Это связано с необходимостью приведения к безразмерному виду и единой шкале изменения значений, например, в предлагаемой модели:

$$0 \leq k_i(U) \leq 1,\ i = [1,\ldots, m]. \quad (14)$$

Кроме того, в общем случае при формировании частных критериев оптимальности в зависимости от цели оптимизации значения одних частных критериев нужно повышать, а значения других уменьшать. Учтем, однако, что задача минимизации критерия путем введения обратного преобразования сводится к задаче максимизации. Поэтому допустим, что в разрабатываемой модели желательна максимизация всех частных критериев оптимальности.

Отметим также возможные ограничения по значению m, т. е. по количеству частных критериев оптимальности (показателей), формируемых при решении конкретных задач. Очевидно, что один критерий, даже комплексный, не может охватить все требования. Современные компьютерные технологии позволяют решать задачи с большим объемом данных без потери точности, поэтому многие исследователи максимально увеличивают количество частных критериев, задействуют даже те факторы, которые практически не влияют на

результат оптимизации. При этом увеличение размерности системы затрудняет построение и может нарушить устойчивость вычислительных алгоритмов, особенно в целевых функционалах с многомодальными функциями.

С математической точки зрения сокращение количества критериев снижает сложность вычислительных алгоритмов и открывает возможность простой графической интерпретации результатов (например, для двумерных или трехмерных критериальных пространств). К тому же упрощается проверка алгоритмов. Задачу можно свести к однокритериальной, а для ее решения есть много проверенных методов. В целом уменьшение размерности (редукция) формируемой системы частных критериев оптимальности (показателей) значительно упрощает решение задачи оптимизации.

Чаще всего для редукции используют метод исключения дублирующих друг друга или малозначимых показателей. Однако при этом можно ошибочно исключить важные факторы. Поэтому в рамках представленной работы задействовали метод редукции, основанный на иерархической структуризации системы частных критериев оптимальности без их искусственного исключения [10].

Итак, рассмотрим функции (процессы) рассматриваемой системы с оптимизируемым объектом — канатной дорогой (рис. 2).

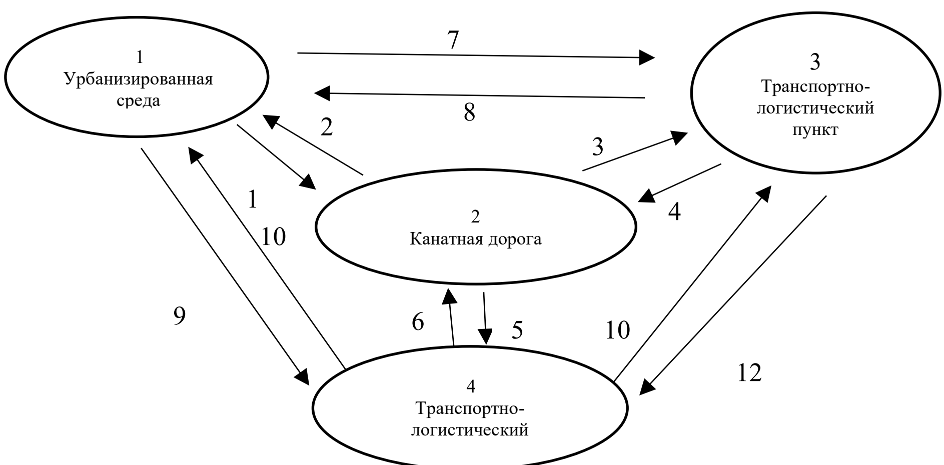


Рис. 2. Функциональная схема системы транспортирования ТБО

В [6] описаны четыре элемента системы транспортирования ТБО.

1. Урбанизированная среда определяет:

– планировку населенных пунктов;

– транспортную инфраструктуру;

– рельеф и ландшафт местности;

– природно-климатические условия;

– вес и объем образующихся ТБО;

– время вывоза ТБО.

2. Канатная дорога выполняет основную функцию — перемещение ТБО к месту утилизации. Основные (в том числе оптимизируемые) характеристики этого элемента системы:

– тип канатной дороги;

– число контейнеров на дороге и между опорами;

– натяжение каната;

– диаметр каната;

– скорость движения;

– шаг дискретных приводов;

– шаг опор.

3. В транспортно-логистическом пункте собираются и какое-то время хранятся ТБО. Основные характеристики:

– площадь;

– высота крытых помещений;

– производительность погрузочно-разгрузочных работ;

– размеры и технические возможности конвейеров;

– количество пустых контейнеров.

4. В транспортно-логистическом терминале ТБО разгружают, перемещают с канатной дороги к месту утилизации. Опустошенные контейнеры направляют на мойку, хранение и дефектацию. Основные характеристики данного элемента системы:

– площадь;
– высота крытых помещений;
– размеры и технические возможности конвейеров;
– производительность погрузочно-разгрузочных работ;
– параметры оборудования для мойки, сушки и дезинфекции пустых контейнеров;
– количество пустых контейнеров.

В таблице 1 описательно представлены взаимодействия элементов, которые показаны на рис. 2 цифрами от 1 до 12.

Таблица 1

Взаимодействие элементов системы транспортирования ТБО по канатной дороге

№	Направление	Взаимодействующие элементы
1	Урбанизированная среда — канатная дорога	Объем и вес ТБО; объем, вес, количество контейнеров; технические характеристики дороги
2	Канатная дорога — урбанизированная среда	Процессы эксплуатации канатной дороги; экологическое состояние среды; показатели безопасности пересекаемых объектов (дороги, водные преграды, строения, сельскохозяйственные угодья и др.)
3	Канатная дорога — транспортно-логистический пункт	Количество и вес пустых контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров в пункт
4	Транспортно-логистический пункт — канатная дорога	Количество и вес загруженных контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров на канатную дорогу
5	Канатная дорога — транспортно-логистический терминал	Количество и вес загруженных контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров в терминал
6	Транспортно-логистический терминал — канатная дорога	Количество и вес пустых контейнеров; скорость и регулярность поступления контейнеров на канатную дорогу
7	Урбанизированная среда — транспортно-логистический пункт	Длина маршрута; транспортная инфраструктура; объем и вес контейнера; грузоподъемность автомобиля; количество автомобилей и контейнеров на автомобиле; скорость автомобиля; скорость и регулярность поступления контейнеров в транспортно-логистический пункт; климатические условия
8	Транспортно-логистический пункт — урбанизированная среда	Процессы эксплуатации транспортно-логистического пункта; экологическая обстановка
9	Урбанизированная среда — транспортно-логистический терминал	Объем и вес ТБО; природно-климатические условия
10	Транспортно-логистический терминал — урбанизированная среда	Процессы эксплуатации транспортно-логистического терминала; экологическая обстановка
11	Транспортно-логистический терминал — транспортно-логистический пункт	Объем и вес ТБО; количество пустых, исключенных и добавленных контейнеров; процессы технического обслуживания и ремонта
12	Транспортно-логистический пункт — транспортно-логистический терминал	Объем, вес ТБО; количество заполненных, исключенных и добавленных контейнеров

На рис. 3 представлено в виде схемы взаимодействие основных параметров рассматриваемой системы для условного района Ростова-на-Дону.

Урбанизированная среда

Масса и объем твердых бытовых отходов: общий и при сортировке
Грузоподъемность машины
Планировка местности
Погодные условия
Время, затраченное на вывоз

Количество грузовиков
Число контейнеров на грузовике
Длина маршрута
Скорость автомобиля
Объем, вес контейнера

Количество контейнеров и скорость их поступления в транспортно-логистический пункт

Транспортно-логистический пункт

Скорость движения контейнера по конвейеру
Количество контейнеров на конвейере
Скорость погрузочно-разгрузочных работ

Количество контейнеров и скорость их поступления на канатную дорогу

Канатная дорога

Натяжение каната
Число контейнеров на дороге
Шаг дискретных приводов и опор
Скорость движения канатной дороги
Характеристика местности (рельеф, перепады высот, естественные препятствия)

Количество контейнеров и скорость их поступления в транспортно-логистический терминал

Транспортно-логистический терминал

Скорость выгрузки контейнера
Скорость движения контейнера по конвейеру
Скорость мойки контейнера
Скорость технического обслуживания контейнера

Количество контейнеров и скорость их возврата на канатную дорогу

Рис. 3. Схема функционального взаимодействия основных показателей системы транспортировки ТБО из условного района Ростова-на-Дону

Рис. 2 и 3 позволяют построить иерархию показателей (рис. 4).

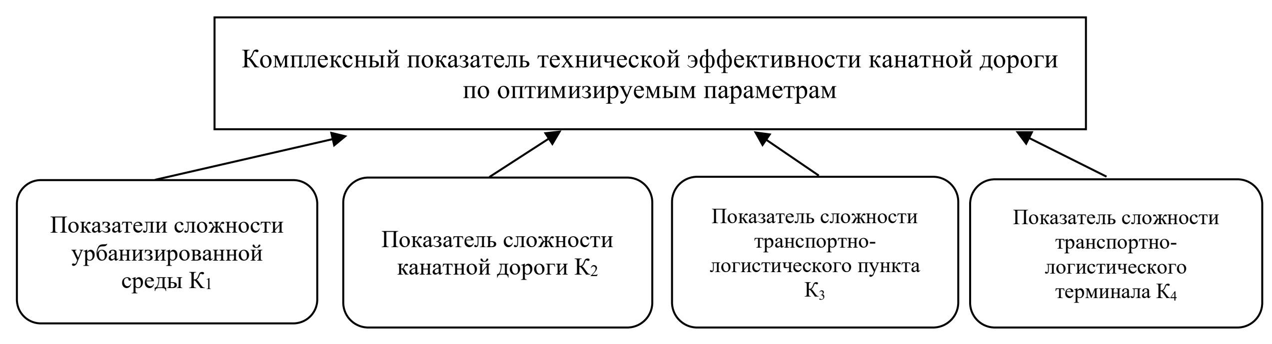


Рис. 4. Иерархическая структура критериев, характеризующих канатную дорогу как систему

https://bps-journal.ru/

Примеры комплексных показателей технической сложности построения и функционирования экологичной системы вывоза твердых бытовых отходов грузовым канатным транспортом в урбанизированной среде показаны в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Комплексные показатели технической сложности канатной дороги как системы транспортировки ТБО

Уровень показателя			Размерность, единица измерения
1-й	2-й	3-й	
Сложность урбанизированной среды $К_1$	Планировка населенного пункта с транспортной инфраструктурой $К_{11}$	Планировка местности $К_{111}$	Очень плохо
			Плохо
			Средне
			Хорошо
			Очень хорошо
		Состояние транспортной инфраструктуры $К_{112}$	Длина улиц с твердым покрытием к общей длине улиц
	Рельеф и ландшафт местности $К_{12}$		Плохо
			Средне
			Хорошо
	Характеристика твердых бытовых отходов (сут) $К_{13}$	Масса $К_{131}$	т
		Объем ТБО $К_{132}$	$м^3$
		Структура $К_{133}$	Твердые
			Жидкие
			Без классификации
	Природно-климатические условия $К_{14}$	Температура $К_{141}$	$С^0$
		Скорость ветра $К_{142}$	м/с
		Влажность воздуха $К_{143}$	%
		Число солнечных дней летом $К_{144}$	Единиц
	Вывоз твердых бытовых отходов $К_{15}$	Частота вывоза ТБО $К_{151}$	Раз в неделю
		Количество грузовиков $К_{152}$	Единиц
		Транспортные расходы (горюче-смазочные материалы, техобслуживание) $К_{153}$	Руб.
		Количество контейнеров на автомобиле $К_{154}$	Единиц
		Длина маршрута $К_{155}$	км
		Скорость автомобиля $К_{156}$	км/час
		Объем контейнера $К_{157}$	$м^3$
		Масса контейнера $К_{158}$	кг
Сложность канатной дороги $К_2$	Характеристики канатной дороги $К_{21}$	Длина канатной дороги $К_{211}$	м
		Число контейнеров на канатной дороге и между опорами $К_{212}^*$	Единиц
		Натяжение каната $К_{213}^*$	кН
		Скорость движения канатной дороги $К_{214}^*$	м/с
		Шаг опор $К_{215}$	м
		Диаметр каната $К_{216}^*$	мм
		Масса загруженных контейнеров $К_{217}$	кг
	Характеристики местности $К_{22}$	Перепад высот $К_{221}$	м
		Препятствия по пути движения $К_{222}$	Плохо
			Средне
			Хорошо

Уровень показателя			Размерность, единица измерения
1-й	2-й	3-й	
Сложность транспортно-логистического пункта К$_{3}$	Планировка транспортно-логистического пункта К$_{31}$	Занимаемая площадь К$_{311}$	м^2
		Высота крытых помещений К$_{312}$	м
	Характеристики погрузочно-разгрузочных работ К$_{32}$	Количество разгрузочных площадок К$_{321}$	Единиц
		Количество погрузочных площадок К$_{322}$	Единиц
		Производительность разгрузки К$_{323}$	Единиц /час
		Производительность погрузки К$_{324}$	Единиц /час
	Характеристики конвейера для пустых контейнеров К$_{33}$	Длина конвейера К$_{331}$	м
		Количество размещаемых контейнеров К$_{332}$	Единиц
		Количество пустых контейнеров, отправленных на хранение К$_{333}$	Единиц
	Характеристики разгоняющего конвейера К$_{34}$	Скорость конвейера К$_{341}$	м/с
		Длина конвейера К$_{342}$	м
		Грузоподъемность К$_{343}$	т
		Мощность привода К$_{344}$	кВт
	Характеристики замедляющего конвейера К$_{35}$	Скорость конвейера К$_{351}$	м/с
		Длина конвейера К$_{352}$	м
		Грузоподъемность К$_{353}$	т
		Мощность привода К$_{354}$	кВт
Сложность транспортно-логистического терминала К$_{4}$	Размер терминала К$_{41}$	Занимаемая площадь К$_{411}$	м^2
		Высота крытых помещений К$_{412}$	м
	Характеристики замедляющего конвейера К$_{42}$	Скорость конвейера К$_{351}$	м/с
		Длина конвейера К$_{352}$	м
		Грузоподъемность К$_{353}$	т
		Мощность привода К$_{354}$	кВт
	Параметры оборудования для выгрузки ТБО из контейнера К$_{43}$	Производительность К$_{431}$	Единиц / час
		Количество кантователей К$_{432}$	Единиц
		Количество площадок для разгрузки К$_{433}$	Единиц
	Параметры оборудования для мойки, сушки и дезинфекции пустых контейнеров К$_{44}$	Длина линии К$_{441}$	м
		Количество позиций мойки К$_{442}$	Единиц
		Давление воды К$_{443}$	МПа
		Характеристика моющих средств К$_{444}$	Плохо
			Средне
			Хорошо
		Скорость сушки К$_{445}$	мин
	Характеристики конвейера для техобслуживания и ремонта пустых контейнеров К$_{45}$	Длина конвейера К$_{451}$	м
		Количество размещаемых контейнеров К$_{452}$	Штук
		Количество пустых контейнеров, отправленных на техническое обслуживание и ремонт К$_{453}$	Штук
		Обслуживание контейнеров К$_{454}$	Плохо
			Средне
			Хорошо
	Характеристики разгоняющего конвейера К$_{46}$	Скорость конвейера К$_{461}$	м/с
		Длина конвейера К$_{462}$	м
		Грузоподъемность К$_{463}$	т
		Мощность привода К$_{464}$	кВт
К* — оптимизируемые параметры.			

Таблица 3

Интервалы изменений показателей сложности канатной дороги

Показатель 3-го уровня	Единица измерения, размерность	Интервал изменения
Длина канатной дороги $К_{211}$	м	1000…50000
Число контейнеров на канатной дороге и между опорами $К_{212}^*$	Единиц	1…20
Натяжение каната $К_{213}^*$	кН	10…15
Скорость движения канатной дороги $К_{214}^*$	м/с	0,5…5
Шаг опор $К_{215}$	м	40…150
Диаметр каната $К_{216}^*$	мм	10…1000
Масса загруженных контейнеров $К_{217}$	кг	500…1500
Перепад высот $К_{221}$	м	0…2000
Препятствия по пути движения $К_{222}$	Плохо	0…1
	Средне	
	Хорошо	

В общем случае на каждом уровне иерархии должно быть не менее двух показателей (за исключением самого верхнего, который представляет собой целевую функцию). При группировке частных критериев на каждом уровне количество критериев (показателей) в группе может меняться от одного до некоторого заданного максимального значения, т. е. $1 \le m \le m_{\max}$. При $m = 1$ показатель верхнего уровня без изменения переходит на нижний и наоборот. Максимальное значение определяется размерностью критериального пространства и сложностью построения вычислительной процедуры оптимизации в этом пространстве. Примем $m_{\max} = 8$.

Все критерии (показатели) нижнего уровня могут быть измеряемыми и неизмеримыми. Примеры для первого случая: «перепад высот», «общая длина». Для второго — «рельеф» (простой, сложный, очень сложный). Для описания таких критериев предлагается использовать методы теории нечетких множеств, т. е. определять функцию принадлежности объекта к соответствующему множеству, как в [10].

Итак, сформулируем задачу многокритериальной оптимизации на максимум для каждой группы частных критериев оптимальности на всех уровнях. Нужно определить вектор-функцию оптимизируемых параметров системы (вектор управления) U на замкнутом множестве $\overline{G_u}$, чтобы достигался максимум целевого функционала

$$K(U) \to \max \tag{15}$$

при условии (13) и ограничениях (9, 10 и 14).

$\overline{G_u}$ — замкнутое множество допустимых управлений в пространстве задаваемых функций (допустимых значений вектора оптимизируемых параметров).

Вектор $U^* \in \overline{G_u}$ называется глобальным решением задачи (15), если $K(U^*) \ge K(U)$ при всех $U \in \overline{G_u}$.

Для решения многокритериальной задачи оптимизации воспользуемся методом скаляризации векторного критерия (13). С этой целью применим аддитивную функцию:

$$K_c(U) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i k_i(U). \tag{16}$$

Для коэффициентов α_i должны выполняться условия:

$$\alpha_i \ge 0 \text{ при } i = 1,...,m; \sum_{i=1}^{m} \alpha_i = 1. \tag{17}$$

Тогда исходная задача (15) сводится к поиску максимума интегрального показателя (16). В данном случае особенно важна методика определения коэффициентов α_i. Это коэффициенты свертки векторного критерия (13) из многокритериального пространства на числовую ось скалярного критерия (16) с физическим смыслом «лучше» — «хуже».

Для расчета коэффициентов свертки можно использовать методику, предложенную в [10]. В этом случае рассматриваются нечеткие отношения на парах объектов из обучающей выборки и интегрального скалярного показателя (16). Строится вычислительная процедура для функционала, определяющего величину невязки.

После определения векторов коэффициентов свертки для всех критериев иерархии нужно найти вектор-функцию оптимизируемых параметров системы (вектора управления) U, когда аддитивная функция (16)

достигает максимума для критерия верхнего уровня иерархии (целевая функция). При этом на множестве параметров целевая функция может иметь несколько локальных максимумов. Среди них нужно найти глобальный. Для решения таких задач есть несколько вычислительных методов [11]. Определенными преимуществами обладают так называемые эволюционные методы. Некоторые из них реализуются на базе специализированной мультидисциплинарной платформы ModeFrontier. Для решения поставленной задачи предлагаем генетический алгоритм [12].

Расчеты. Оптимизируемые параметры канатной дороги, как показано в таблице 2, входят в показатель K_2:

$$K_2 = 0,6K_{21} + 0,4K_{22}.$$

K_{21} (характеристика сложности канатной дороги) определяется по формуле:

$$K_{21} = 0,1K_{211} + 0,15K_{212} + 0,15K_{213} + 0,25K_{214} + 0,1K_{215} + 0,1K_{216} + 0,15K_{217}.$$

K_{22} (характеристика местности), определяется по формуле:

$$K_{22} = 0,5K_{221} + 0,5K_{222}.$$

Использование прикладных программных продуктов позволило показать результаты расчетов в виде графических зависимостей K_{21} и K_2 от оптимизируемых параметров на рис. 5–8. При этом численные значения изменяемых параметров определялись по данным табл. 2.

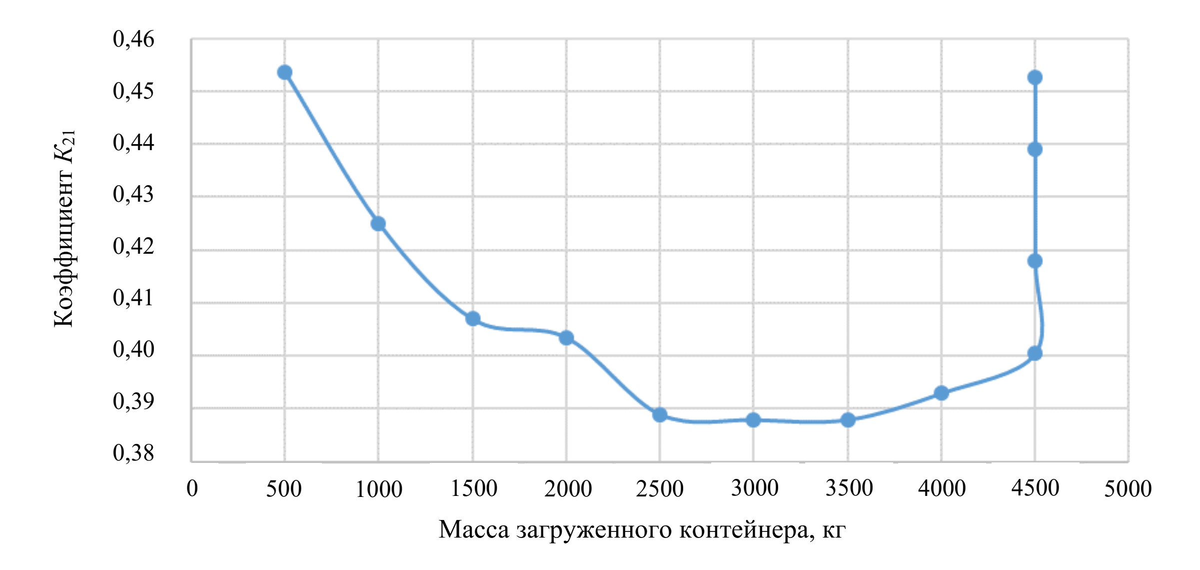


Рис. 5. Зависимость коэффициента K_{21} от массы загруженного контейнера при длине канатной дороги 20 тыс. м

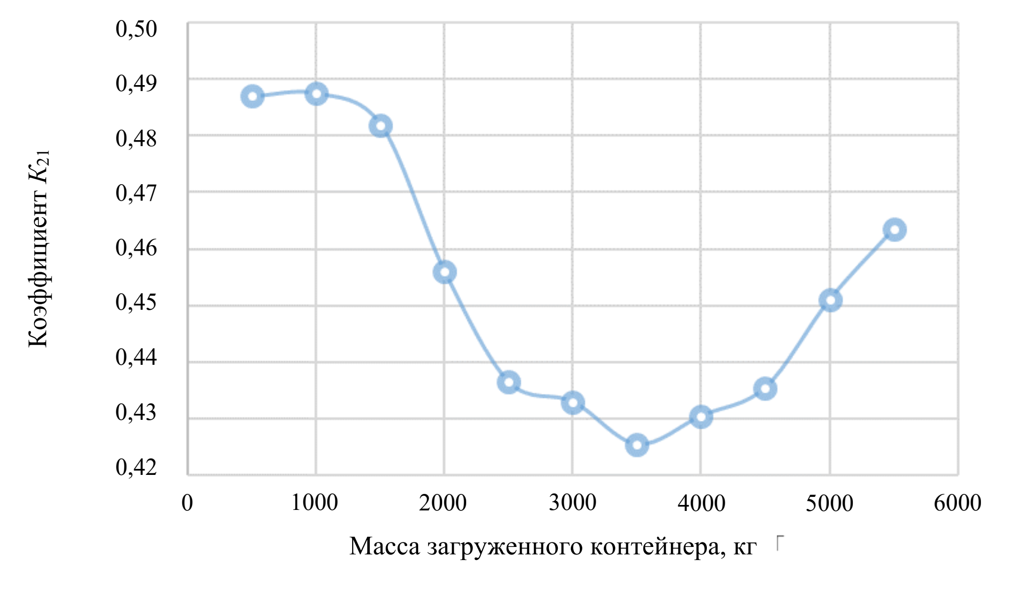


Рис. 6. Зависимость коэффициента K_{21} от массы загруженного контейнера при длине канатной дороги 40 тыс. м

Рис. 5 и 6 демонстрируют выраженный экстремум для показателя K_{21} (характеристика сложности канатной дороги) в диапазоне массы загруженного контейнера 2500…4500 кг. Это можно объяснить тем, что при использовании контейнеров с малой массой необходимо увеличить их количество для обеспечения заданной производительности. Как следствие растет число элементов системы, то есть она усложняется. Использование контейнеров с большой массой требует введения в систему таких элементов, как дополнительные дискретные приводы, системы гашения вибраций, увеличение толщины каната и др., что также усложняет систему.

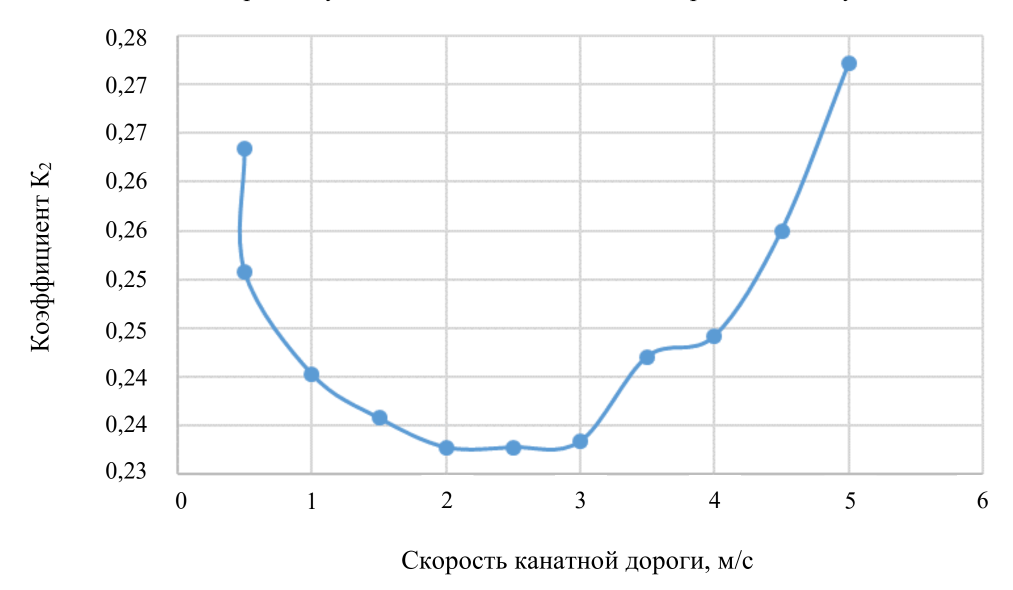


Рис. 7. Зависимость коэффициента K_2 от скорости канатной дороги длиной 20 тыс. м

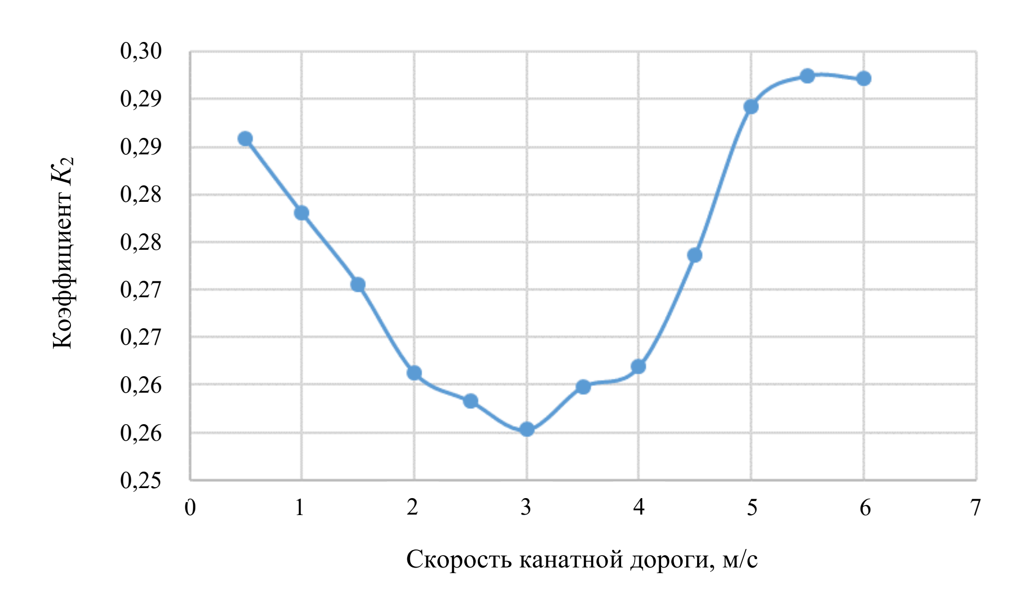


Рис. 8. Зависимость коэффициента K_2 от скорости канатной длиной 40 тыс. м

Рис. 7 и 8 показывают, что в диапазоне скоростей канатной дороги 1,5–3,5 м/с показатель K_2 имеет наименьшие значения сложности, так как на низких скоростях требуется большее количество контейнеров, а на высоких необходимы дополнительные устройства для стабилизации движения.

Обсуждение и заключение. Итак, в качестве оптимизируемых параметров канатной дороги рассмотрены ее сложность и особенности местности. В первом случае для оптимизации нужно учитывать длину дороги, количество контейнеров, массу загруженных контейнеров, натяжение и диаметр каната, скорость движения канатной дороги и шаг опор. Во втором случае расчет базируется на данных о перепаде высот и возможных препятствиях по пути движения. Обе группы этих параметров демонстрируют сложность канатной дороги с точки зрения технологии и среды (показатель 1-го уровня K_2).

Предложена модель решения многопараметрической и многокритериальной задачи оптимизации характеристик канатной дороги. Она позволяет менять иерархию показателей. Данный подход можно

использовать при необходимости интеграции проекта с нейросетевыми моделями, в работе с нечеткими лингвистическими показателями, для решения прикладных задач.

Список литературы

1. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. *Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро*. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2017. 344 с. URL: http://ntb.donstu.ru/content/razvitie-transportnoy-infrastruktury-krupnyh-gorodov-i-territoriy-na-osnove-tehnologii-kanatnogo-metro (дата обращения: 25.08.2023).

2. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро. *Вестник Брянского государственного университета*. 2014;4:22–30. URL: http://vestnik-brgu.ru/wp-content/numbers/v2014_4.pdf (дата обращения: 09.08.2023).

3. Korotky A.A., Marchenko E.V., Popov S.I., Marchenko Ju.V., Dontsov N.S. Theoretical foundations of modeling the process of transport vehicles steel ropes structural defects formation. In: *E3S Web of Conferences*. 2020;175:05018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505018

4. Кинжибалов А.В. *Повышение безопасности пассажирских канатных дорог на основе оценки риска и резервирования привода*. Автореф. дис. канд. тех. наук. Новочеркасск; Южно-Российский государственный технический университет: 2008. 24 с. URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003457469?page=1&rotate=0&theme=white (дата обращения: 09.08.2023).

5. Korotky A.A., Marchenko E.V., Ivanov V.V., Popov S.I., Marchenko Ju.V., Dontsov N.S. Model of forming vibration mechanochemical solid lubrication coating on surface of steel rope. In: *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2019;403:012116. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012116

6. Marchenko Ju.V., Korotky A.A., Popov S.I., Marchenko E.V., Galchenko G.A., Kosenko V.V. Municipal waste management in an urbanized environment based on ropeway technology. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;246:235–241. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_26

7. Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Поперечные колебания каната, движущегося в продольном направлении. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2017;19(4):161–166. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poperechnye-kolebaniya-kanata-dvizhuschegosya-v-prodolnom-napravlenii/viewer (дата обращения: 09.08.2023).

8. Костоглотов А.А., Дерюшев В.В., Костоглотов А.И. Идентификация параметров динамических систем на основе объединенного принципа максимума. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки.* 2004;S2:13–18. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-parametrov-dinamicheskih-sistem-na-osnove-obedinennogo-printsipa-maksimuma/viewer (дата обращения: 09.08.2023).

9. Аргучинцев А. В. *Оптимальное управление начально-краевыми условиями гиперболических систем.* Дис. д-ра физ.-мат. наук. Иркутск; 2004. 237 с.

10. Дерюшев В.В., Коробецкий Д.И., Сорокина Д.Н. Математическая модель построения комплексного показателя безопасности эксплуатации грузоподъемных машин. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2019;(4):13–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-13-18

11. Marchenko Ju.V., Popov S.I. The use of a unified container in an ecological automated system for the removal of solid household waste in an urbanized environment based on rope transport technologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;575:1304–1311. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-21219-2_146 (дата обращения: 24.09.2023).

12. Черных С.В. Многопараметрическая оптимизация многомодальных функций. *Вестник Российского государственного университета им. И. Канта*. 2010;(10):94–103. URL: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/367/iimdxxrrccww.pdf (дата обращения: 09.08.2023).

References

1. Korotkii AA, Lagerev AV, Meskhi BCh, Lagerev IA, Panfilov AV. *Razvitie transportnoi infrastruktury krupnykh gorodov i territorii na osnove tekhnologii kanatnogo metro.* Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2017. 344 p. URL: http://ntb.donstu.ru/content/razvitie-transportnoy-infrastruktury-krupnyh-gorodov-i-territoriy-na-osnove-tehnologii-kanatnogo-metro (accessed: 25.08.2023). (In Russ.).

2. Lagerev AV, Lagerev IA. Optimizatsiya shaga ustanovki promezhutochnykh opornykh konstruktsii vdol' linii kanatnogo metro. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;4:22–30. URL: http://vestnik-brgu.ru/wp-content/numbers/v2014_4.pdf (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

3. Korotky AA, Marchenko EV, Popov SI, Marchenko JuV, Dontsov NS. Theoretical foundations of modeling the process of transport vehicles steel ropes structural defects formation. In: *E3S Web of Conferences*. 2020;175:05018. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505018

4. Kinzhibalov AV. *Povyshenie bezopasnosti passazhirskikh kanatnykh dorog na osnove otsenki riska i rezervirovaniya privoda.* Author's abstract. Novocherkassk; South-Russian State Technic University: 2008. 24 p. URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003457469?page=1&rotate=0&theme=white (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

5. Korotky AA, Marchenko EV, Ivanov VV, Popov SI, Marchenko JuV, Dontsov NS. Model of forming vibration mechanochemical solid lubrication coating on surface of steel rope. In: *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2019;403:012116. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012116

6. Marchenko JuV, Korotky AA, Popov SI, Marchenko EV, Galchenko GA, Kosenko VV. Municipal waste management in an urbanized environment based on ropeway technology. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022;246:235–241. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_26

7. Anisimov VN, Litvinov VL. Transverse vibrations rope moving in longitudinal direction. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017;19(4):161–166. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poperechnye-kolebaniya-kanata-dvizhuschegosya-v-prodolnom-napravlenii/viewer (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

8. Kostoglotov AA, Deryushev VV, Kostoglotov AI. Identifikatsiya parametrov dinamicheskikh sistem na osnove ob"edinennogo printsipa maksimuma. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus region. Natural sciences.* 2004;S2:13–18. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-parametrov-dinamicheskih-sistem-na-osnove-obedinennogo-printsipa-maksimuma/viewer (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

9. Arguchintsev AV. *Optimal'noe upravlenie nachal'no-kraevymi usloviyami giperbolicheskikh sistem.* Author's abstract. Irkutsk; 2004. 237 p. (In Russ.).

10. Deryushev VV, Korobetskiy DI, Sorokina DN. Mathematical model of construction of the complex index of safe operation of hoisting machines. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2019;4:13–18. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-13-18

11. Marchenko JuV, Popov SI. The use of a unified container in an ecological automated system for the removal of solid household waste in an urbanized environment based on rope transport technologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;575:1304–1311. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_146

12. Chernykh SV. Mnogoparametricheskaya optimizatsiya mnogomodal'nykh funktsii. *Vestnik of Immanuel Kant Russian State University.* 2010;(10):94–103. URL: https://journals.kantiana.ru/upload/iblock/367/iimdxxrrccww.pdf (accessed: 09.08.2023). (In Russ.).

Поступила в редакцию 12.10.2023
Поступила после рецензирования 29.10.2023
Принята к публикации 01.11.2023

Об авторах

Марченко Юлианна Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, AuthorID, ORCID, marchenko-6470@mail.ru

Дерюшев Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID

Попов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, spopov1957@yandex.ru

Марченко Эдвард Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, AuthorID, ORCID, daedwardrambler.ru@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

Ю.В. Марченко, С.И. Попов — разработка концепции исследования, функциональной схемы транспортировки твердых бытовых отходов, схемы функционального взаимодействия основных показателей системы, разработка иерархической структуры критериев.

Ю.В. Марченко — постановка и решение задачи многокритериальной оптимизации для систем с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Э.В. Марченко — определение оптимизируемых параметров канатной дороги, рассмотрение примеров комплексных показателей технической сложности построения и функционирования системы вывоза твердых бытовых отходов грузовым канатным транспортом.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 12.10.2023
Revised 29.10.2023
Accepted 01.11.2023

About the Authors:

Yulianna V. Marchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, AuthorID, ORCID, marchenko-6470@mail.ru

Viktor V. Deryushev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID

Sergey I. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, spopov1957@yandex.ru

Edward V. Marchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, AuthorID, ORCID, daedwardrambler.ru@mail.ru

Claimed contributorship:

YuV Marchenko, SI Popov: development of the research concept, functional scheme of solid waste transportation, scheme of functional interaction of the system main indicators, development of the hierarchical structure of criteria.

YuV Marchenko: formulation and solution of the problem of multi-criteria optimization for systems with concentrated and distributed parameters.

EV Marchenko: determination of the optimized parameters of a cable car, consideration of the examples of complex indicators of the technical complexity of the construction and functioning of the solid waste removal system by cargo cable transport.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.